

ВЗРЫВНОЙ ПЬЕЗОГЕНЕРАТОР С ЭНЕРГИЕЙ 50 Дж ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

А. А. Утенков, М. В. Антипов, А. В. Блинов, А. Л. Михайлов, В. А. Огородников, И. В. Юртов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Для создания начального тока в рабочем объеме нагрузки, в качестве которой применяются спиральные магнитокумулятивные генераторы (МКГ) 1, рис. 1, представляющие интерес как источники мощных импульсов тока, требуется сторонний источник энергии. В качестве источника начальной запитки выступает взрывной пьезогенератор (ВПГ) 2, рис. 1, представляющий собой источник электрических импульсов однократного действия, использующий энергию взрывчатого вещества. ВПГ находят применение в случаях, когда требуется автономный, малогабаритный, постоянно готовый к работе, не требующий обслуживания источник электрических импульсов.

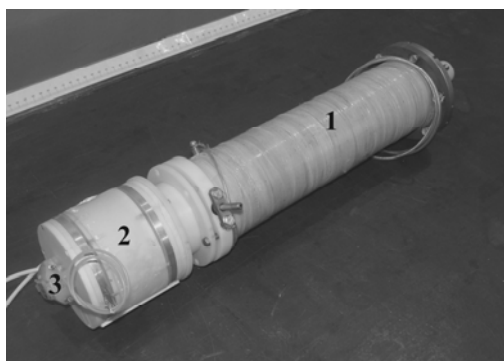


Рис. 1. ВПГ в составе автономного источника: 1 – МКГ, 2 – ВПГ, 3 – электродетонатор (ЭД)

На рис. 2 представлены этапы развития и совершенствования конструкций ВПГ, в которых последовательно пройден путь получения энергий 6 Дж → 12 Дж → 25 Дж → 50 Дж, при различных вариантах нагружения.

Нагружение блока пьезокерамики (ПК) ВПГ проводили:

- одной плоской ударной волной (УВ) – 6 Дж,
- плоской и клиновидной УВ – 12 Дж (двухстороннее нагружение),
- двумя сходящимися клиновидными УВ при цилиндрической – 25 Дж и прямоугольной – 50 Дж форме блока ПК.

При создании конструкции ВПГ-1050 на 50 Дж разработана технология одноразовой заливки элек-

трического блока без последующей доработки, рис. 3. Плоские нагружаемые поверхности получают применением съемной технологической оснастки, в которую осуществляется заливка компаундом со стороны токовыводов.

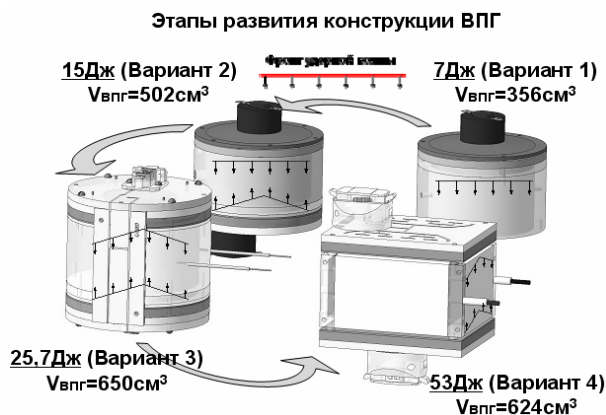


Рис. 2. Развитие конструкций ВПГ для запитки ВМГ

Поскольку объем ПК модернизированного ВПГ (вариант 4, рис. 2) увеличен на 50 %, по сравнению с вариантом 3, использовали в качестве внешней оболочки изолирующий компаунд. Для крепления технологической оснастки, а затем и нагружающих устройств использовали угловые упоры, которые образовывали вместе с отвержденным компаундом внешнюю изолирующую оболочку ВПГ. Пьезоэлементы в ВПГ расположили вдоль оси запитываемого МКГ.

Этапы изготовления модернизированной конструкции ВПГ представлены на рис. 3.

Заливка компаундом осуществляется в отверстия технологической оснастки 1, рис. 3,а, расположенные между токовыводами 2 ВПГ, рис. 3. Таким образом, возникающие в процессе отверждения компаунда неоднородности не требуются дорабатывать, рис. 3,б, так как они находятся вне зоны нагружения, что существенно упрощает цикл подготовки сборки к опыту (рис. 3,в,г).

Схема ВПГ с нагружением блока ПК двумя клиновидными ударными волнами показана на рис. 4.

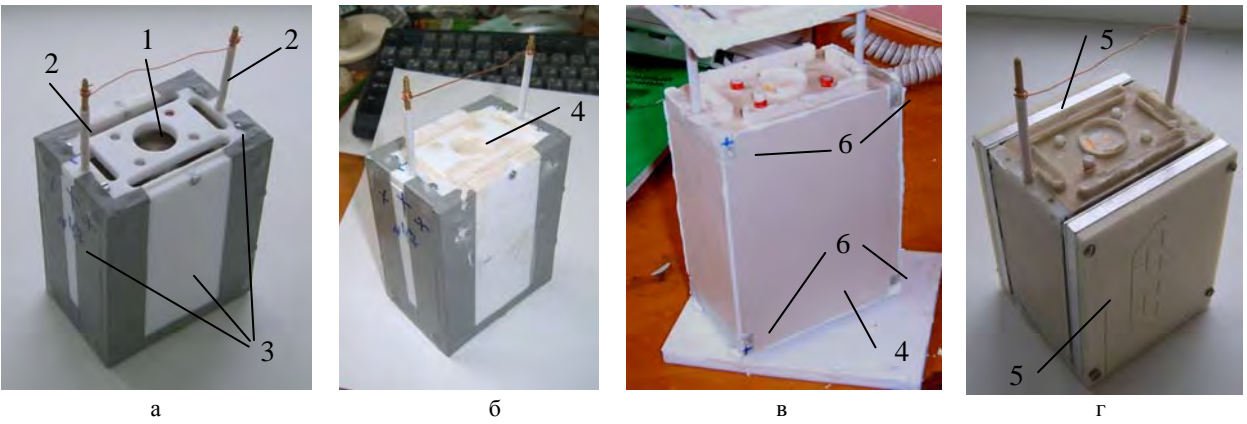


Рис. 3. Этапы изготовления модернизированной конструкции: а – сборка в технологической оснастке до заливки: 1 – отверстия для заливки компаунда, 2 – токовывод, 3 – технологическая оснастка; б – сборка залитая компаундом: 4 – отвержденный компаунд; в – сборка после снятия технологической оснастки: 6 – угловые упоры; г – сборка подготовлена к опыту: 5 – нагружающие устройства (НУ)

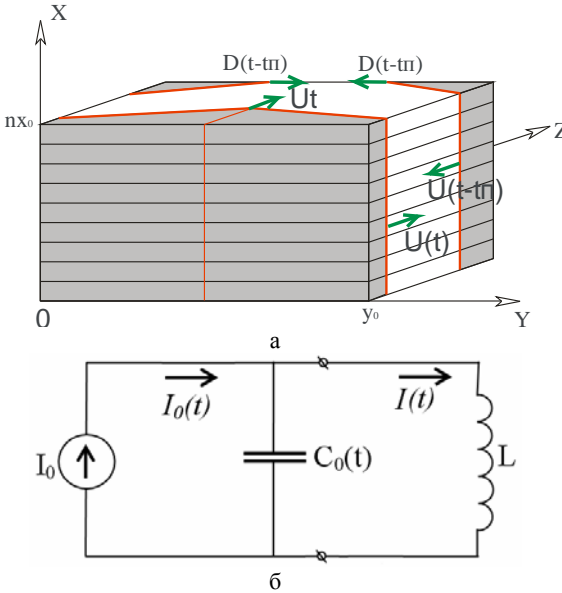


Рис. 4. Схема нагружения ВПГ сходящимися клиновидными ударными волнами: а – блок ПК, нагружаемый двумя клиновидными УВ, б – эквивалентная схема ВПГ

В соответствии с представленной схемой, рис.4, ударного нагружения блока ПК, его ток деполяризации может быть представлен в виде:

$$I_0(t) = \frac{\Delta Pr}{x_0} \cdot \frac{dV_{сж}}{dt} \quad (1)$$

где $V_{сж} = x_0 \cdot n \cdot S(t)$ – ударно-сжатый объем блока ПК, $S(t)$ – площадь сжатой зоны одной из пьезопластин, x_0 – расстояние между электродами пьезоэлемента, n – число пьезопластин в блоке.

В процессе ударного нагружения блока можно выделить два интервала времени:

- во время первого интервала $0 < t < t_n$ блок ПК нагружается расходящейся клиновидной УВ. При этом время $t_n = y_0/2D$ равно времени полного нагружения ближней грани блока ПК, где D – скорость детонационной волны, y_0 – длина блока ПК;

- во время второго интервала $t_n < t < T$ блок ПК дополнительно нагружается сходящейся клиновидной волной, движущейся от одной к другой грани блока. При этом время $T - t_n = y_0/2D$ равно времени полного нагружения дальней грани блока.

Поскольку сжатие блока ПК происходит с двух сторон, то площадь электродов пьезопластин, соответствующая ударно сжатой части блока, можно записать сначала для первого интервала времени $0 < t < t_n$, а затем и для второго $t_n < t < T$ в виде:

$$S(t) = nDut^2 + nDu(t - t_n)^2 \quad (2)$$

$$S(t) = S_1(t) = nDut^2 \quad (3)$$

Производная площади нагружения $S(t)$ будет иметь один и тот же вид в первом и втором интервале времени работы ВПГ $0 < t < T$:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d(nDut^2)}{dt} = 2nDu \quad (4)$$

В соответствии с этим, выражение для тока деполяризации будут иметь вид:

$$I_0(t) = 2nP_r Du t \quad (5)$$

Электрическое состояние эквивалентной схемы (рис. 4,б) описывается уравнением 6

$$LC_0 \frac{d^2 I}{dt^2} + I = 2nP_r u D t \quad (6)$$

Его решение при нулевых начальных условиях $I(0) = 0$ и $\dot{I}(0) = 0$ имеет вид:

$$I(t) = 2nP_r u D \left(t - \frac{1}{\omega} \sin(\omega t) \right) \quad (7)$$

Полученное решение хорошо согласуется с результатами эксперимента и используется при расчете конструкции ВПГ.

В рассматриваемом ВПГ первый генератор УВ нагружает блок ПК клиновидной расходящейся ударной волной. Второй генератор УВ срабатывает

через заданное время и отличался от первого тем, что его инициирование производится с помощью детонационного распределителя по двум линиям на краях электрического блока ВПГ (рис. 4), и образовывалась сходящаяся клиновидная УВ с отставанием в центре. В результате этого ударное нагружение блока ПК осуществлялось двумя движущимися навстречу клиновидными ударными волнами так, как это показано на рис. 5 и рис. 6.

При анализе работы ВПГ с энергией $W_0 \approx 25$ Дж, в котором блок ПК последовательно нагружался двумя клиновидными ударными волнами, было отмечено, что дальнейшее повышение вырабатываемой им энергии может быть осуществлено увеличением генерируемого тока за счет добавления еще одного пьезоэлемента в электрический блок ВПГ.

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (8)$$

где W – генерируемая энергия ВПГ, I – ток ВПГ, L – индуктивность нагрузки.

Поскольку существующая конструкция уже работала с параметрами, близкими к максимальным по напряженности поля E_0 внутри ПК и напряжению на выходе ВПГ V_0 , то в соответствии с [8],

$$V_0 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin(\omega \cdot t) \quad (9)$$

Параметры ВПГ в расчетах и эксперименте

№ опыта	L, мкГн	C _{ПК} , (ε=1600)	T _{вкл} ,	E ₀ ,	I _{max} , А	V ₀ , кВ	W ₀ , Дж	U _{ПК} , см ³
Опыт 25 Дж	1050	2,72	3,2	2,2	220	52	25,2	115,2
Расчет 25 Дж	1050	2,04	3,2	2,2	220	52,6	25,3	115,2
Расчет 50 Дж	1050	3,32	4,5	2,5	311	59	50,2	172,8

$T_{вкл}$ – задержка времени включения второго каскада (распределителя) НУ, E_0 – рабочее электрическое поле блока ПК, I_{max} – максимальный рабочий ток ВПГ, V_0 – максимальное рабочее напряжение на выходе ВПГ, W_0 – энергия, переданная в нагрузку, $U_{ПК}$ – объем пьезокерамики ВПГ.

где C – собственная емкость ВПГ, $\omega = \sqrt{1/LC_0}$ потребовалось увеличить время включения второго каскада (распределителя) НУ на 1,3 мкс. При этом была уменьшена скорость нарастания тока в цепи нагрузки, что привело к сохранению напряжения на выходах ВПГ в допустимом диапазоне (см. табл. 1).

Проведен эксперимент в постановке, показанной на рис. 5 и рис. 6.

Поскольку редакция опыта предполагала для ограничения максимального напряжения в электрическом блоке ВПГ использовать сдвиг по времени между срабатываниями НУ, дополнительно проводили измерения их временных параметров. На наружных торцах концевых иницирующих элементов распределителей были установлены пьезоотметчики (ПО) методики контроля системы инициирования. Всего было установлено четыре ПО на одном и два ПО на другом распределителе, рис. 6. Для контроля срабатывания обоих задействованных в опыте ЭД были

использованы индуктивные датчики нуля ДИН-1 и ДИН-2, закрепленные на вставках розеток ЭД (рис. 5,б).

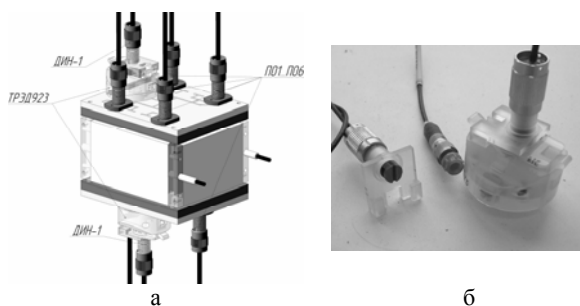


Рис. 5. Постановка датчиков МКСИ на экспериментальную сборку и ЭД: а – экспериментальная сборка с установленными индуктивными датчиками нуля (ДИН-1), б – установка ДИН – 1 на ЭД

Вид на распределители с местами установки ЭД, индуктивных датчиков нуля и ПО показан на рис. 6.а. Задержку времени срабатывания нагружающих устройств осуществляли за счет смещения расположения точек инициирования на каналах детонационной разводки.

Для предотвращения возможного электрического пробоя по поверхности электрического блока

Таблица 1

ВПГ, он был помещен в контейнер с трансформаторным маслом (рис. 6,б), поэтому каждое НУ иницировалось своим ЭД.

В опыте получены следующие результаты:

- индуктивными датчиками нуля зарегистрированы токи в обоих ЭД. Разновременность прихода иницирующего импульса на ЭД составила менее 5 нс;
- пьезоотметчиками измерено время срабатывания распределителей и их разновременность.

В результате проведенного опыта:

- получен ток 320 А при напряжении 55 кВ на индуктивную нагрузку 1034 мкГн. Энергия запитки составила рекордное значение 53 Дж, что составляет $\sim 0,3$ Дж/см³. Полученный результат в целом совпадает с ожидаемыми расчетными значениями, что свидетельствует о корректной работе модели расчета;

- время от начала инициирования до максимума тока запитки индуктивной нагрузки составило $(20,2 \pm 05)$ мкс.

Полученные результаты представлены в табл. 2.

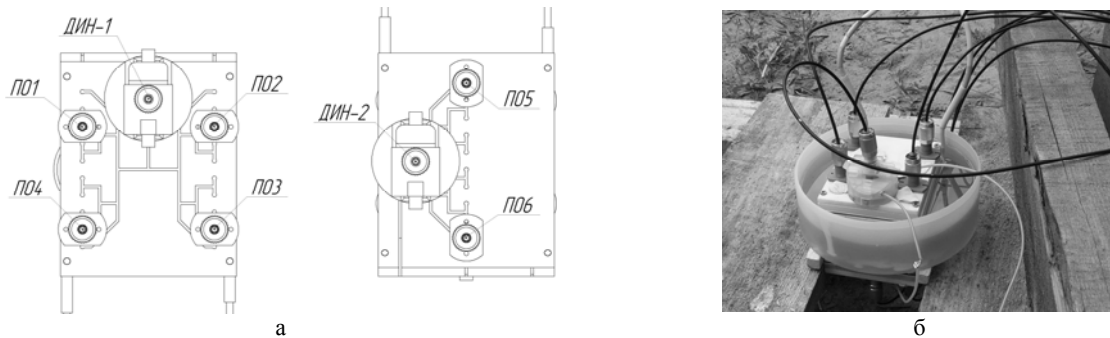


Рис. 6. Постановка опыта: а – вид на ВПГ со стороны распределителей, б – макет ВПГ с установленными датчиками контроля системы иницирования

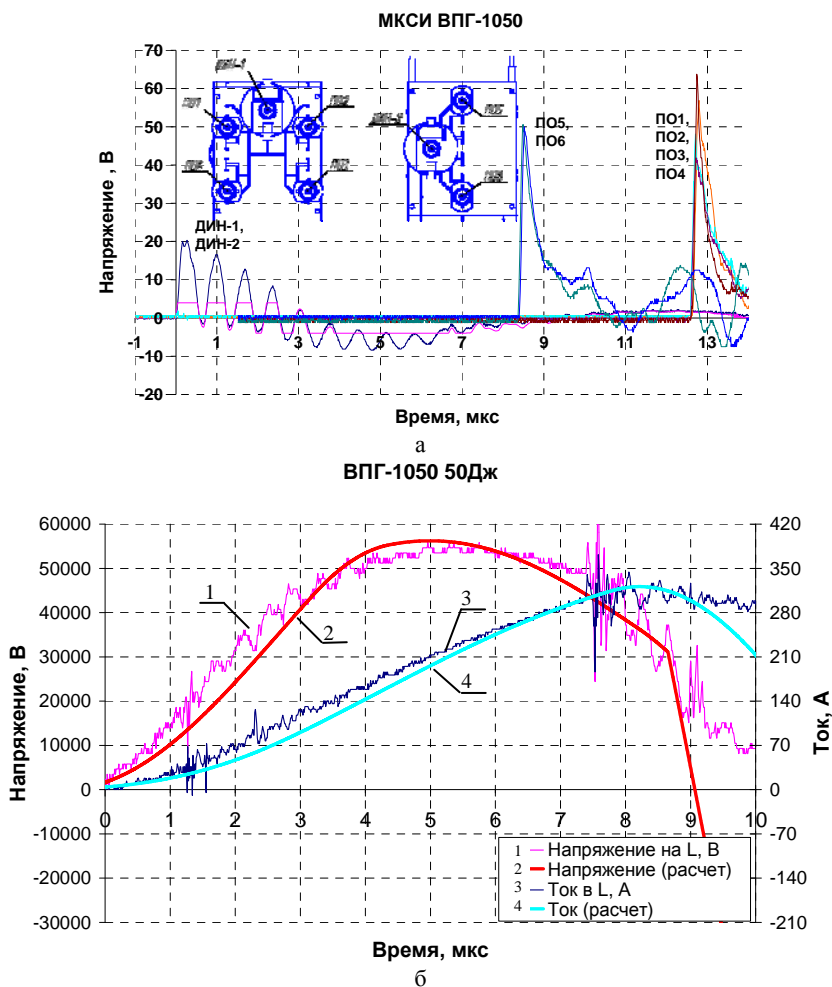


Рис. 7. Результаты опыта: а – результаты контроля системы иницирования, б – ток и напряжение в индуктивной нагрузке

Таблица 2

Параметры ВПГ в расчете и экспериментах

№ опыта	L, мкГн	T _{вкл} , мкс	E ₀ , кВ/мм	I _{max} , А	V ₀ , кВ	W ₀ , Дж	U _{ПК} , см ³
Опыт 25 Дж	1050	3,7	2,2	220	52	25,6	115,2
Расчет 50 Дж	1050	4,35	2,5	318	60	53,2	172,8
Опыт 50 Дж	1050	4,23	2,3	320	55	53	172,8

T_{вкл} – задержка времени включения второго каскада нагружающего устройства, E₀ – рабочее электрическое поле блока ПК, I_{max} – максимальный рабочий ток ВПГ, V₀ – максимальное рабочее напряжение на выходе ВПГ, W₀ – энергия, переданная в нагрузку, U_{ПК} – объем пьезокерамики ВПГ.

Таким образом за счет добавления еще одного пьезоэлемента в электрический блок ВПГ (увеличили объем пьезокерамики в 1,5 раза), при сохранение объема ВПГ, благодаря перестройке схемы сборки и применению новой технологии изготовления ВПГ, увеличили генерируемый взрывным пьезогенератором ток \sim в 1,5 раза с 220 А до 320 А. Энергия, передаваемая в индуктивную нагрузку, увеличилась в \sim 2 раза с 23 Дж до 53 Дж. Напряжение на выходе ВПГ за счет изменения времени включения второго нагружающего устройства осталось прежним \sim 55 кВ.

Литература

1. Демидов В. А., Пляшкевич Л. Н., Селемир В. Д. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии. моногр. // Саров: ВНИИЭФ, 2011, 439 с.
2. Demidov V. A., Sadunov V. D., Kazakov S. A., Golosov S. N., Utenkov A. A., Boriskin A. S., Antipov M. V., Blinov A. V., Yurtov I. V. Studying Autonomous Magneto-Cumulative Energy Source. // PLASMA SCIENCE, January 2015, Vol. 43, No 1, P. 339–343
3. Садунов В. Д., Трищенко Т. В., Утенков А. А., Блинов А. В., Антипов М. В., Демидов В. А. Патент РФ № 2419952. Способ генерирования электрического импульса в индуктивной нагрузке взрывного пьезогенератора. Оpubл. в Бюл. № 15, 2011.